

## „Performance Gap“ in der Schweiz – Brisanz, Ursachen und Einflüsse auf die Differenz von geplantem Energiebedarf und gemessenem Verbrauch in Gebäuden

Christian Struck, Hochschule Luzern; Michael Benz, 3 Plan; Viktor Dorer, EMPA; Beat Frei, ADZ; Monika Hall, FHNW; Martin Menard, Lemon Consult; Sven Moosberger, EQUA Solutions; Kristina Orehounig, ETHZ; Carina Sagerschnig, Gruner Roschi AG

[christian.struck@hslu.ch](mailto:christian.struck@hslu.ch)

Zusammenfassung

Résumé

Abstract

Traditionell beschreibt der „Performance-Gap“ die Differenz der Planungszielgrößen, z.B. Jahresenergieverbrauch und Überhitzungsstunden, zwischen Gebäudekonzept während der Planungsphase sowie gebauten und genutzten Gebäude. Diese Differenz kann erheblich sein. Besondere Brisanz erhält das Ausmass des „Performance-Gap“ bei der Planung und dem Betrieb von Null- bzw. Plusenergiegebäuden und der Gewährleistung der gewünschten Performance während des Anlagenbetriebes. Der vorliegende Beitrag thematisiert das Ausmass des „Performance-Gap“ in der Schweiz anhand von sieben dokumentierten Fallstudien. Das vorhandene Datenmaterial zeigt, dass die Gründe für den Performance-Gap vor allem in der Nutzung, Regelungstechnik und im Detailierungsgrad des genutzten Simulationsmodelles zu suchen sind. Die Review zeigt, dass es zur Gewährleistung einer gewünschten Energiebilanz auch während der Betriebsphase, drei Dinge braucht: (1) die Betrachtung der Variabilität in der Gebäudenutzung, Spezifikation und Bauqualität schon während der Planungsphase; (2) ein erweiterbares Modell des Gebäudes und der Gebäudetechnik, sowie (3) kontinuierliches Betriebsmonitoring während der Gebäudenutzung.

The performance gap traditionally describes the difference between key performance indicators during design and operation of a building. The observed differences can be significantly. The observed phenomenon becomes particularly important when designing and operating net-zero or energy positive buildings. This conference discusses the performance-page using seven case studies from Switzerland. The presented data shows that the causes for performance-gap lie predominantly in the building and system use, system controls and degree of simulation model abstraction. The authors conclude that it needs three things to maintain the design to enery balance during building operation: (1) consideration of the variability of the building use, building specification, quality of craftsmanship already during design; (2) an extendable model of the building and its systems and (3) continuous performance monitoring.

## 1. Ausgangslage

Ein Ziel der Schweizer Energiestrategie 2050 sieht vor, den Energieverbrauch von Neu- und Bestandsbauten drastisch zu senken. Das Einsparpotential bei Neubauten wird durch UVEK und BFE auf 3.56 TWh und im Bestand auf 8.5 TWh geschätzt [1]. Das hohe Energiesparpotential im Bestand soll durch Betriebsoptimierung (4.4 TWh) und Energieinspektionen (4.1 TWh) erreicht werden. Um diese Potentiale in der Gebäudeplanungs- und Betriebspraxis zu erreichen, benötigt es einer integralen und detaillierten Herangehensweise. Die integrale Planung ermöglicht die Berücksichtigung, der komplexen Zusammenhänge von z.B. der Gebäudeform, des Verglasungsanteils, der Materialisierung und der Gebäudetechnik-komponenten sowie deren Regelung. Bedingt durch die Komplexität der Gebäude- und Anlagentechnik und der oft scheinbar im Gegensatz zu einander stehenden Planungsziele, wie z.B. Minimierung des Energieeinsatzes und Maximierung der thermischen Behaglichkeit, ist die händische Ermittlung der Planungsparameter, welche den best-möglichen Kompromiss darstellen sehr anspruchsvoll. Der Einsatz von dynamisch-thermischen Gebäudesimulationsprogrammen in der Planungsphase ermöglicht es diese Komplexität zu adressieren. Sie stellt ein geeignetes Werkzeug dar, um Lösungsansätze zu identifizieren. Jedoch hat der Einsatz von Gebäudesimulationswerkzeugen in der Schweizer Planungs- und Betriebspraxis bislang eine eher untergeordnete Rolle, nicht zum Schluss durch die vermeintlich grossen Differenzen zwischen simulierten und gemessenen Energiedaten [2]. Bedingt durch das unumstrittene Potential von Simulationswerkzeugen in der Planungspraxis hat sich IBPSA Schweiz ([www.ibpsa.ch](http://www.ibpsa.ch)) unter anderem zum Ziel gesetzt, dass Thema „Performance-Gap“ mit dem Fokus auf Simulationswerkzeuge kritisch zu bearbeiten. IBPSA-CH ist ein Verein mit mehr als 100 Mitgliedern und repräsentiert das Schweizer Chapter der International Building Performance Simulation Assoziation.

## 2. Herangehensweise

Um das Phänomen „Performance-Gap“ in der Schweiz zu verdeutlichen, wurden in einem ersten Schritt sieben Schweizer Gebäude identifiziert, bei denen in der Planungsphase Gebäudesimulationen zur Anwendung gekommen sind und für welche Messwerte aus der Betriebsphase vorliegen. Die betrachteten Gebäude umfassen sowohl Freizeiteinrichtungen und Bürobauten. Auf Basis der vorhandenen Dokumentationen und Veröffentlichungen wird für diese Gebäude die spezifische „Performance-Gap“ bestimmt und deren Ursachen und Einflussfaktoren untersucht. Weiterhin wurden die Ursachen für den „Performance-Gap“ nach Wichtigkeit, Einfluss und Häufigkeit zusammengefasst und geordnet. Der so aufgestellte Katalog bildet die Grundlage dafür, die grössten und häufigsten Einflussfaktoren auf die „Performance-Gap“ zu bestimmen und Handlungsempfehlungen zu formulieren.

## 3. Der „Performance-Gap“ in der Schweiz

Traditionell beschreibt der „Performance Gap“ die Differenz der Planungszielgrössen, z.B. Jahresenergieverbrauch und Überhitzungsstunden, zwischen Gebäudekonzept während der Planungsphase sowie gebauten und genutzten Gebäude. Mit der stetigen Verschärfung der nationalen aber auch europäischen Normwerke und dem mittelfristigen Ziel, Net-Zero Energiebilanzen zu erzielen werden die Differenzen zwischen Zielwerten während der Planung und im Betrieb stärker wahrgenommen. In Abbildung 1 sind verschiedene Möglichkeiten für das Auftreten des "Performance-Gap" dargestellt. Beispielhaft wird in Abbildung 1 auf den erfahrungsgemäss auftretenden „Performance-Gap“ zwischen dem Vorprojekt und der Betriebsphase hingewiesen. Dieser kann sich aus den einzelnen oder kumulierten „Performance-Gaps“ zwischen Vorprojekt und Bauprojekt bzw. Bauprojekt und Bewirtschaftung zusammensetzen.

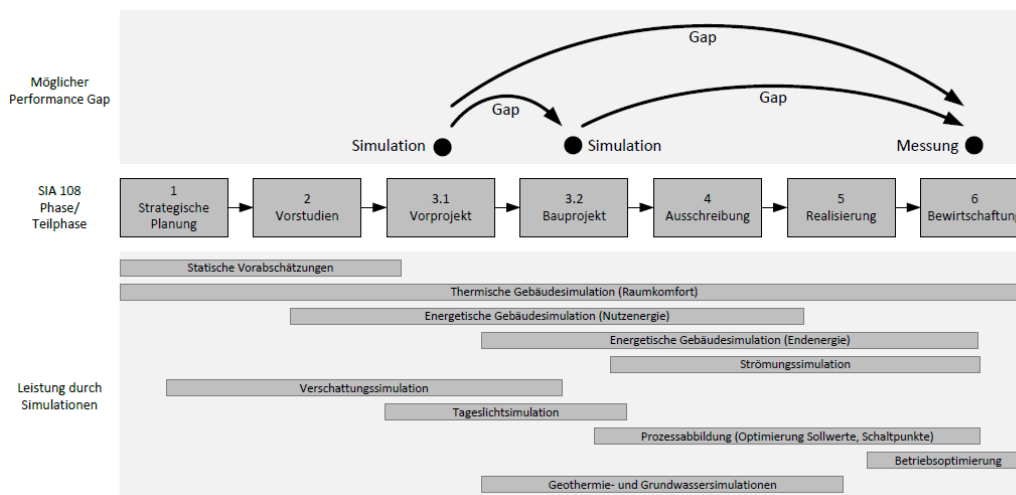


Abbildung 1, „Performance-Gap“ in Bezug auf die Phasen des Planungsprozessen nach SIA 108

Es gibt eine Vielzahl von Studien die sich mit der Erfolgskontrolle von Gebäuden auseinandersetzen. Dabei liegt der Fokus häufig auf der Prüfung ob Gebäude im Betrieb den energetischen Standard erreichen, z.B. Passivhaus, Minergie oder Minergie P, nach dem Sie geplant und zertifiziert wurden. [3-5]. Aktuell ist eine vom Bundesamt für Energie beauftragte Studie in Bearbeitung, die darauf abzielt anhand mehrerer hundert Gebäude den Erfolg bei der Umsetzung von nach MuKE 2008, Minergie-P, Minergie und Minergie-A Gebäuden zu dokumentieren. Während diese Studien in der Regel die Differenzen zwischen den mit Hilfe statischer Nachweisverfahren errechneten Werten den realen Verbrauchswerten gegenüberstellen, liegt der Fokus hier auf mittels dynamischer Simulationen errechneten Bedarfswerte.

### 3.2 Dokumentierte Fallstudien

Im folgenden Abschnitt werden, die auf Basis der verfügbaren Dokumentationen, für sieben Schweizer Gebäude, siehe Tabelle 1, die spezifische „Performance-Gap“ bestimmt und deren Ursachen und Einflussfaktoren beschrieben.

Tabelle 1, Fallstudienübersicht

Pos.	Gebäude	Nutzung	Typ
1	Forum Chriesbach	Verwaltung	Neubau
2	Monte Rosa Hütte, Zermatt	Freizeit	Neubau
3	Actelion Gebäude, Allschwil	Verwaltung	Bestand
4	Hauptsitz Mövenpick, Kempththal	Verwaltung	Neubau
5	HIT Gebäude, Zürich	Verwaltung	Neubau
6	Bourbaki Panorama, Luzern	Freizeit	Historisches Gebäude
7	Mehrfamilienhaus, Zürich	Wohnen	Etappierte Erneuerung

#### Gebäude 1: Forum Chriesbach/Dübendorf

Das Forum Chriesbach auf dem Empa-Eawag Areal in Dübendorf ist ein Gebäude mit 150 Büroarbeitsplätzen, Bibliothek, Sitzungs-Schulungs- und Vortragsräumen, und Personalrestaurant. Das Gebäude besitzt ein grosses Atrium und verfügt weder über ein konventionelles Kühl- noch über ein Heizsystem (ausser im EG), ist aber an den Arealnetzen angeschlossen. Panels solarthermisch und PV sind auf dem Dach montiert. Mechanische Lüftung mit WRG und Erdregister/ Fensterlüftung/ passive Kühlung durch automatische Fensterlüftung. Ziel der dynamischen Mehrzonen-Simulationen mit TRNSYS 16.1 waren: (1) Überprüfung der Planungswerte Energie; (2) Abschätzung der energetischen Beiträge einzelner Komponenten (z.B.

Erdregister); (3) Abschätzung thermischer Komfort; (4) Sensitivitätsanalysen (bezügl. Nutzung, Aussenklima). Die Simulationen wurden mit Planungswerten und dann auch mit den gemessenen effektiven Nutzungsdaten durchgeführt. Die detaillierten Messdaten der zweijährigen Betriebsoptimierung dienen zum Vergleich mit der Simulation.

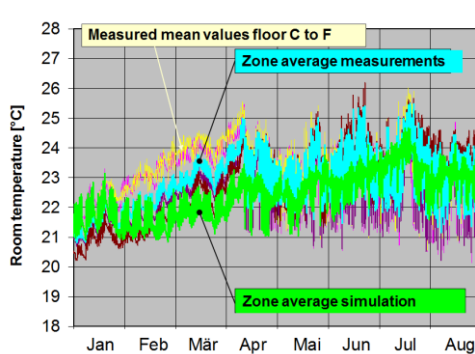


Abbildung 2, Raumlufttemperaturen - vergleichende Betrachtung für eine Zone

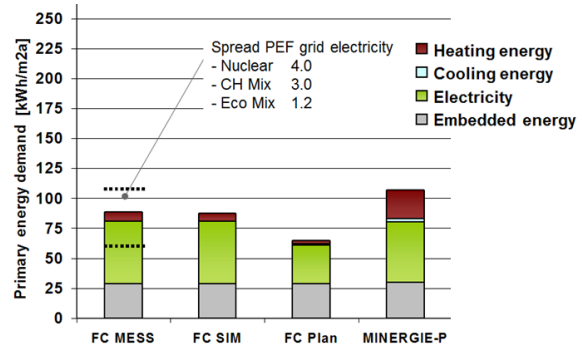


Abbildung 3, Primärenergiebedarf – vergleichende Betrachtung der Planungszielwerte, mit den Ergebnissen des kalibrierten Simulationsmodells und gemessenen Verbrauchswerten

Die gemessene maximale Raumtemperatur in den Büroräumen war zonengemittelt rund 1 K höher als die berechnete, im Einzelraum bis 2K höher, siehe Abbildung 2. Als Gründe für Abweichungen wurden folgende Punkte ermittelt: (1) in der Simulation wurden mehrere Büroräume zu einer thermischen Zone zusammengefasst; (2) die an der Innenwand positionierten Messfühler zeigten gegenüber der mittlere Raumtemperatur systematisch etwa +1K höhere Werte an; (3) da die Atriumbeschattung nur teilweise richtig funktionierte, resultierten daraus höhere Solargewinne als berechnet, (4) für die natürliche Nachtlüftung wurde, basierend auf Ergebnissen einer detaillierter Studie, mit fixem Ansatz für die Lüfraten gerechnet.

Bei Verwendung der effektiven Nutzungsdaten in der Simulation konnte bezüglich Jahresprimärenergieverbrauch eine sehr gute Übereinstimmung mit der Messung erzielt werden. Die Simulation mit geplanter Nutzung ergab einen zu optimistischen Wert, siehe Abbildung 3. Die Gründe dafür waren (1) die reell tiefere Belegung und somit kleineren Personenwärmegewinne; (2) die zu hohen Einstellungen bei den Thermostatventilen; und (3) der höhere Warmwasserverbrauch. Zudem war auch der gemessene Stromverbrauch höher als prognostiziert.

### Gebäude 2: Monte Rosa Hütte

Die neue, im September 2009 in Betrieb genommene Monte Rosa-Hütte in den Schweizer Alpen auf einer geografischen Höhe von 2883m stellte für das Planungsteam eine besondere Herausforderung da. Das Ziel, den Betrieb der Hütte mit einem Autarkiegrad von 90% (exkl. Energie zum Kochen) zu gewährleisten, sollte durch eine innovative Integration von Photovoltaikpaneelen, Batteriespeichern und solarthermischen Kollektoren erreicht werden.



Abbildung 4, Monte Rosa Hütte, Zermatt (Foto: Tonatiuh Ambrosetti)

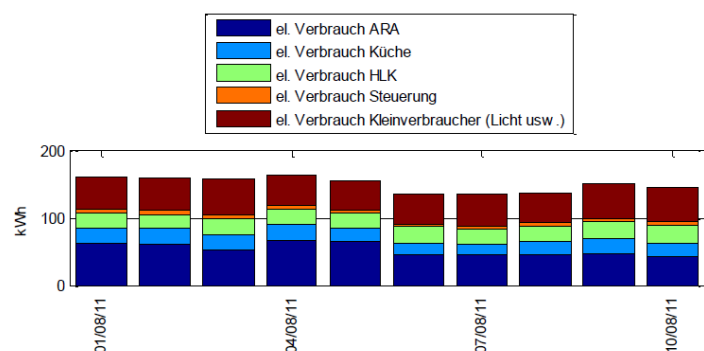


Abbildung 5, Elektrischer Energieverbrauch vom 1.-10. August 2011 [6]

Als ergänzende Stromquelle zur Spitzenlastdeckung bzw. als redundantes System bei einem Ausfall der Photovoltaikanlage wurde ein mit Rapsöl betriebenes Blockheizkraftwerk vorgesehen. Der Wasserbedarf wird mit Schmelzwasser aus der Umgebung der Hütte gedeckt. Dieses wird im Sommer gesammelt und in einer Kaverne gespeichert, so dass auch in Zeiten ohne

Schmelzwasser fließendes Wasser in der Hütte vorhanden ist. Ein Rückblick auf die ersten Betriebsjahre hat gezeigt, dass der gewünschte Autarkiegrad nicht erreicht werden konnte [6]. Gründe dafür sind sowohl in der Technik als auch in der Nutzung der Hütte zu suchen. So überstieg die reale Anzahl der Übernachtungen im Jahr 2011 (11200) die Planungswerte (6500) um 70%. Weiterhin musste das BHKW entgegen der ursprünglichen Betriebsstrategie täglich betrieben werden, da der Bedarf an elektrischer Energie die Annahmen, um den Faktor 3 überstiegen. Die technischen Aspekte, die bei der Analyse des energetischen Anlagenbetriebs bzw. der Erreichung des Autarkiegrads hindern, sind z.B.: (1) die nutzungsbedingte Erweiterung der Abwasserreinigungsanlage; (2) die Umnutzung der Abwasserspeichertanks, (3) die Optimierung der PV-Ladereglereinstellungen zur Vermeidung von Leistungseinbrüchen in Folge von Überhitzung sowie (4) die teilweise fehlerhafte Installation von Messequipment bzw. die Installation von Sensorik mit (zu) hoher Messunsicherheit.

### Gebäude 3: Actelion

Im Rahmen des Forschungsprojektes OptiControl ([www.opticontrol.ethz.ch](http://www.opticontrol.ethz.ch)) der ETH Zürich, Siemens, MeteoSchweiz, Empa und Gruner AG wurden verschiedene Gebäudesimulationsmodelle entwickelt. Die Modelle waren Grundlage für die Entwicklung neuartiger Regelstrategien für die Anwendung der integrierten Raumautomation [7]. Im Projekt wurden neue, vorausschauende Regelungskonzepte und zugehörige Softwarebausteine für kommerzielle Gebäudeautomationssysteme entwickelt und in einem Demonstrationsgebäude getestet. Das ausgewählte Demonstrationsgebäude befindet sich in Allschwil bei Basel. Das Gebäude der Firma Actelion Pharmaceuticals Ltd. wurde 2007 erbaut und ist seitdem störungsfrei und für die Nutzer komfortabel in Betrieb. Es hat 6 Geschosse und eine Energiebezugsfläche von rund 6'000m<sup>2</sup>. Die Architektur ist kubus-förmig und schnörkellos. Auch die Konstruktion des Massivbaus kann als typisch erachtet werden (Aussendämmung, Wärmeschutzisolierverglasung, rund 50% Glasflächenanteil). Die Heizung und die Kühlung erfolgen hauptsächlich mittels thermoaktiver Bauteilsysteme (TABS). Eine mechanische Lüftung mit Energierückgewinnung sorgt für einen hygienischen Luftaustausch. Die Nutzung ist ebenfalls typisch für ein Bürogebäude. Das Gebäude- und Anlagenmodell wurde anhand von Messungen ausführlich validiert und der Validierungsprozess detailliert dokumentiert [8]. Die Modellvalidierung fand auf mehreren Ebenen statt: zum einen wurden einfache Plausibilitätstests durchgeführt; des Weiteren wurde die Modelldynamik der Raumtemperaturen mittels verschiedener Kurzzeitmessungen am Gebäude verglichen (Sprungantworten von TAB-System und Lüftungsanlage). Abschliessend wurde der Energiebedarf mit Langzeitmessungen über mehrere Wochen verglichen. Dabei wurden die Simulationsmodelle entweder direkt mit den gemessenen Daten betrieben, Open-Loop, um möglichst gleiche Randbedingungen wie im Gebäude zu erreichen. Alternativ wurden die gleichen Regelalgorithmen wie im Gebäude eingesetzt, Closed-Loop. Die Autoren der Studie konnten nachweisen, dass die Raumlufttemperaturen im Mittel und im qualitativen Verlauf sehr gut reproduziert werden konnten. Der simulierte Nutzenergiebedarf für Heizung und Kühlung zeigte teilweise deutliche Abweichungen zu den Messdaten. Die Abweichungen wurden auf spezifische Modellannahmen (z.B. für die Fensterlüftung) zurückgeführt. Die Studie dokumentiert, dass der vorhandene „Performance-Gap“ nicht allein von den getroffenen Modellannahmen abhängt. Auch die simulierte Regelstrategie und die Art der Integration von Messdaten in das Simulationsmodell beeinflussen Abweichungen zwischen Modell und Messung teilweise erheblich.

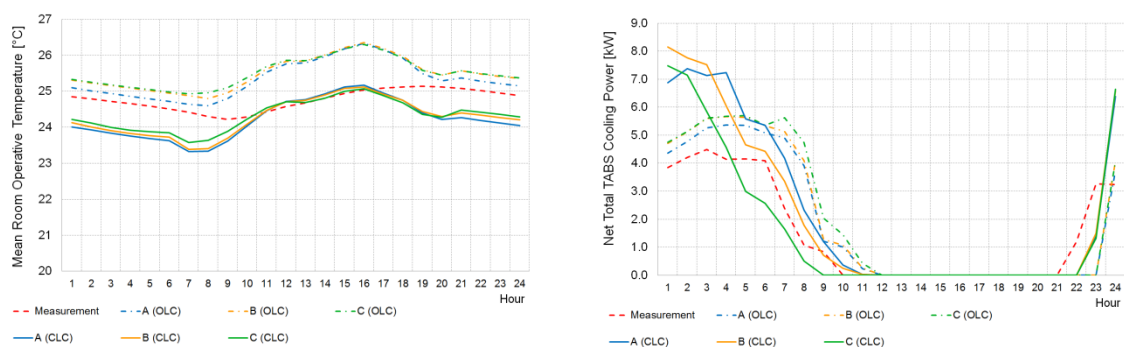


Abbildung 6: Vergleich von gemessenen und simulierten mittleren Tagesverläufen der Raumtemperatur (links) und des Kühlbedarfs der TABS (rechts).



*Bemerkung: A bis C beschreiben verschiedene Modellversionen. Durchgezogene Linien sind Closed Loop Simulationen (CLC). Strichlierte Linien sind Open Loop Simulationen (OLC). Messung = rot. [7]*

Der angetroffene „Performance-Gap“ wirkte sich nicht negativ auf das Projekt aus. Die entwickelten Simulationsmodelle wiesen eine ausreichende Genauigkeit und Robustheit auf, um stabile Regelstrategien entwickeln und erfolgreich am Demonstrationsgebäude testen zu können.

#### **Gebäude 4: Hauptsitz Mövenpick**

Der Hauptsitz von Marché International, einem Unternehmensbereich von Mövenpick, ist ein dreigeschossiges Verwaltungsgebäude in Kempptthal, siehe Abbildung 7. Das Gebäude ist mit dem Label MINERGIE-P-ECO zertifiziert und als erstes Bürogebäude in der Schweiz mit einer Nullenergiebilanz konzipiert. Es wurde 2007 mit dem Schweizer und 2008 mit dem europäischen Solarpreis ausgezeichnet und ist seit 2007 im Betrieb. Bei diesem Projekt liegt der Fokus auf dem Energieverbrauch. Die Messungen zeigen, dass die tatsächlichen Verbrauchswerte von den Planungswerten abweichen, siehe Abbildung 8.



Abbildung 7, Marché International, Kempptthal [9]

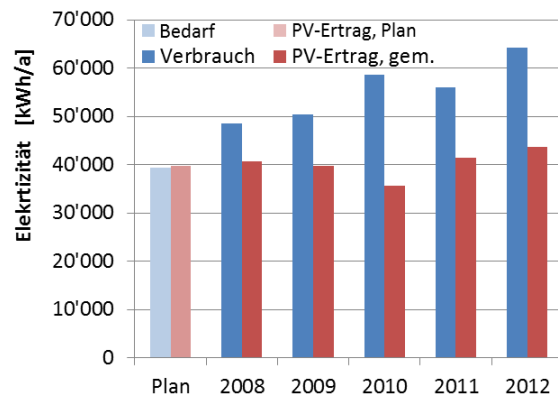


Abbildung 8, Vergleichende Darstellung von Planungszielwerten und Messwerten für die Periode von 2008-2012 [10]

Die Ursachen für das Auftreten des „Performance-Gap“ sind vielfältig. So sind die Anzahl der Arbeitsplätze und der Warmwasserverbrauch höher als erwartet. Der effektive Verbrauch von Bürogeräten ist höher, als die Herstellerangaben ausweisen. Die Beleuchtung leuchtet trotz Bewegungs- und Helligkeitssensoren länger als geplant. Es gibt eine zusätzliche Gebäudenutzung als während der Planung festgelegt wurde (Cafeteria mit Gastro-Geschirrspüler anstatt normaler Haushalts-Geschirrspüler und einer zweiten Kaffeemaschine). Es zeigt sich, dass der „Performance-Gap“ darauf beruht, dass zum einen in der Planungsphase die genaue Nutzung und Ausstattung unklar definiert war und die Herstellerangaben für den Verbrauch als zu niedrig angegeben wurden. Zum anderen funktioniert die Beleuchtung nicht wie geplant. Diese wird kontinuierlich optimiert.

#### **Gebäude 5: HIT ETH Zürich**

Bereits in der Vorprojektphase wurden beim HIT-Bürogebäude der ETH Zürich, siehe Abbildung 9, betreffend Optimierung der Behaglichkeit und des Gesamtenergiebedarfs ausgiebig Simulationswerkzeuge zur Optimierung der HLK Systeme und der Beschattungselemente eingesetzt [11]. Gerade hinsichtlich der Optimierung im Betrieb ist es entscheidend die Realität gut abbilden zu können (Minimierung des „Performance-Gap“), da ansonsten suboptimale Systeme mit deutlich höherem Energiebedarf eingesetzt werden, respektive im schlimmeren Fall, der Komfort der Nutzer nicht mehr sichergestellt werden kann. Die Wärme- und Kälteversorgung des Bürogebäudes erfolgt über ein Nahwärme- bzw. Nahkältenetz, welches den gesamten Campus am Standort Höggerberg versorgt. Das Gebäude ist mit einem statischen Sonnenschutz ausgerüstet, welcher Strahlungsgewinne im Winterhalbjahr zulässt, direkte Sonneneinstrahlung im Sommer aber möglichst verhindern soll. Zusätzlich ist die Hauptlüftungsanlage als Kreisverbundsystem gestaltet, welches die Abwärme eines kleinen Rechencenters zusätzlich zur Erwärmung der Zuluft verwendet.



Abbildung 9, HIT Gebäude ETH Zürich

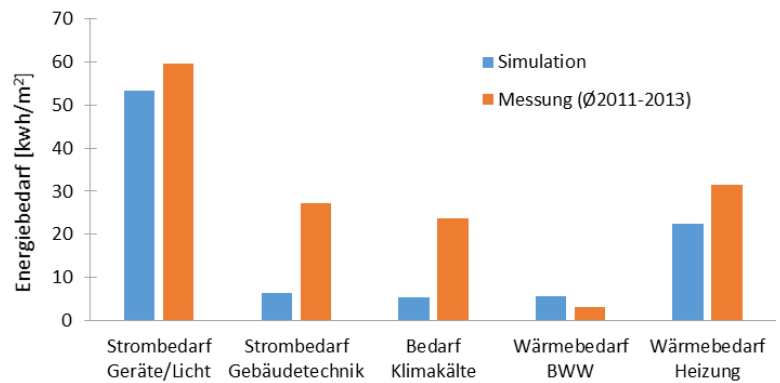


Abbildung 10, Vergleichende Darstellung von Energiekennwerten auf Basis Simulation und Messung

Der Vergleich der Messungen und der Simulation zeigen, dass der Strombedarf für Licht und Geräte in der Planungsphase sehr gut abgeschätzt wurde. Der Strombedarf der Gebäudetechnik wurde jedoch deutlich unterschätzt. Ursachen dafür können ein nicht bedarfsgerechter Betrieb der Lüftungsanlage, hydraulische Pumpen mit unnötig hohen Förderleistungen sowie zusätzlich installierte Verbraucher wie Umluftkühlgeräte in den IT-Räumen und im Rechencenter sein.

Sowohl der Bedarf an Klimakälte als auch der Wärmebedarf sind ebenfalls unterschätzt worden, siehe Abbildung 10. Dies ist einerseits auf das Nutzerverhalten zurückzuführen, welcher z.B. wesentliche höhere Raumtemperaturen im Winter und tiefere im Sommer wünscht, Fenster öffnet, zusätzliche Geräte mit erhöhter Abwärme installiert. Andererseits kann aber auch eine schlecht abgestimmte Regelung verantwortlich sein, welche gleichzeitigen Kühl- und Heizbetrieb ermöglicht und somit zu einem gesteigerten Energiebedarf für die Raumklimatisierung führen kann.

### Gebäude 6: Bourbaki Panorama

Das Bourbaki Panorama Luzern, siehe Abbildung 11, wurde in den Jahren 1996 bis 2000 umfassend umgebaut und erweitert. Mit einer Fläche von rund 1000m<sup>2</sup> stellt das weltweit einmalige Bourbaki Panoramabild bezüglich Raumlufftfeuchte hohe Anforderungen an das Raumklima im Bildraum. Kritische Übersäuerungsprozesse des Panoramabildes, welche bei hoher Raumlufftfeuchte einsetzen, müssen aus konservatorischer Sicht vermieden werden.

Das Bourbaki Panorama wurde 1995 mit dem Simulationsprogramm DOE 2.1e erstmals mit den Projektdaten simuliert. 2003 erfolgte eine Aktualisierung des Simulationsmodells mit den effektiven Gebäudedaten. Für den Bildraum mit einem Volumen von 17'063m<sup>3</sup> wurden danach mehrere Optimierungsvarianten berechnet, um eine Entscheidungsgrundlage für die Dachsanierung und damit die nachhaltige Konservierung und Präsentation des Panoramabildes zu erhalten. Mit den vorhandenen Messwerten für die Jahre 2001 bis 2003 wurde das Simulationsmodell in der Grundvariante derart kalibriert, dass die Raumlufftemperatur und die Raumlufftfeuchte übereinstimmend mit den Messwerten wiedergegeben werden konnten. Zudem konnten die stündlichen und täglichen Schwankungen der beiden Raumklimaparameter durch die Modellkalibrierung ebenfalls richtig wiedergegeben werden.



Abbildung 11, Bourbaki Panorama Luzern

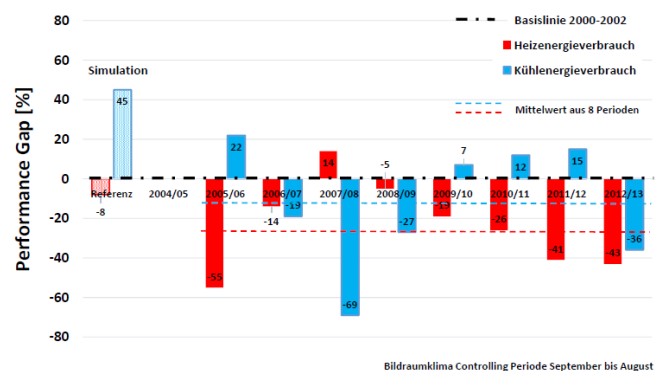


Abbildung 12, Vergleichende Darstellung von Heiz und Kühlenergiebedarf des Bildraumes.

Die schlussendlich gewählten Sanierungsschritte Dachwärmedämmung, Dachfensterersatz und optimierte Raumklimatisierungsstrategie wurden im bereits kalibrierten Simulationsmodell bestmöglich integriert und abgebildet. Das zukünftig zu erwartende Bildraumklima wurde auf der Grundlage des „Design Reference Year“ Datensatzes für Luzern detailliert berechnet. Der Energiebedarf für Heizung und Kühlung des Bildraumes im späteren Betrieb wurden ebenfalls prognostiziert. Um eine nachhaltige Konservierung des Panoramabildes zu gewährleisten wurde seit 2004 ein mehrjähriges Bildraumklima-Monitoring durchgeführt. Die Periode September 2004 bis August 2005 wurde für eine erweiterte Inbetriebsetzung genutzt, um das Bildraumklima bestmöglich an die konservatorischen Raumklimaanforderungen anzupassen. Es mussten keine Anpassungen in der Regelungsstrategie vorgenommen werden.

Somit stehen aktuell acht Bildraumklima-Controlling Perioden zur Auswertung zur Verfügung. Der „Performance-Gap“ wurde wie folgt ermittelt: Die Energieverbrauchsdaten vor der Sanierung wurden über die Jahre 2000 bis 2003 gemittelt und bilden die Referenz für die Energieverbrauchsdaten der nachfolgenden Perioden. Dieser „Performance-Gap“ und die Prognose der Simulation werden in Abbildung 12 dargestellt. Die Daten zeigen, dass die Sanierung in Bezug auf Ihren Einfluss auf den Heiz- und Kühlenergieverbrauch ein Erfolg war. Gegenüber dem Zustand vor der Sanierung konnten im Mittel über die acht Perioden 12% Kühlenergie und 24% Heizenergie eingespart werden. Die Abweichungen bezüglich Bedarf und Verbrauch lassen sich wie folgt erklären:

- Die Simulation beruht auf den damaligen DRY-Daten der Station Luzern Allmend. Das Bourbaki Panorama befindet sich jedoch in der Innenstadt.
- Tendenziell waren die acht Perioden verglichen mit dem DRY-Datensatz zu warm. Dies zeigt sich auch in den realisierten Einsparungen seit der Dachsanierung.
- Das Bourbaki Bildpanorama liess sich mit seiner Fähigkeit als Feuchtespeicher im DOE2.1 Simulationsmodell nicht ganz zufriedenstellend abbilden. Mutmasslich hätten hier mit der Wahl einer anderen Simulationsumgebung noch besser belastbare Aussagen erzielt werden können.
- Der Performance Gap fällt im Bildraum des Bourbaki Panorama Luzern bisher unkritisch für die Gewährleistung des Raumklimas aus

### **Gebäude 7: Erneuerung eines Mehrfamilienhauses.**

Ein besonderer Fall von Performance-Gap kann beim Heizwärmebedarf beobachtet werden. Wie mehrjährige Erfahrung aus der Sanierungsberatung zeigt, liegt der nach SIA 380/1 berechnete Heizwärmebedarf von bestehenden, nicht wärmedämmten Gebäuden oft deutlich über dem gemessenen Verbrauch. Eine Reihe von nationalen und internationalen Untersuchungen bestätigt diesen Trend [12-15]. Umgekehrt verhält es sich bei Neu- und Umbauten, wo der berechnete Heizwärmebedarf zum Teil deutlich unter dem im Betrieb festgestellten Verbrauch liegt [16, 17].



Abbildung 13, Schrittweise erneuertes Mehrfamilienhaus in Zürich

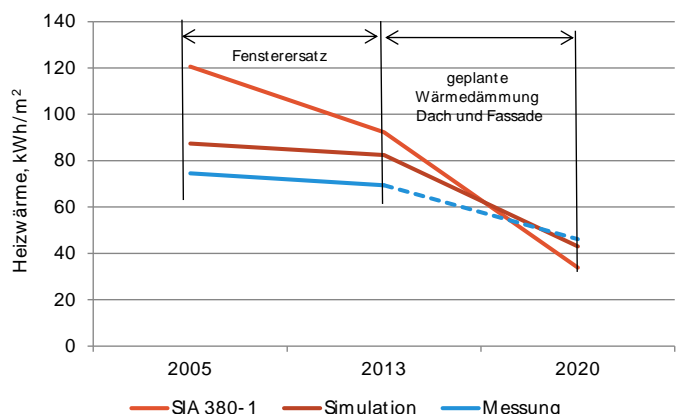


Abbildung 14, Unterschiedlicher Performance-Gap bei der Prognose des Heizwärmebedarfs mit Simulationen und nach SIA 380/1

Beim schrittweisen Ersatz der alten Fenster eines Mehrfamilienhauses wurde festgestellt, dass die Berechnung des Heizwärmebedarfs mit einer Simulation (Stundenverfahren nach SIA 2044) deutlich näher bei den Messwerten liegt, als der mit den identischen Gebäudehüllflächen und U-



Werten berechnete Wert nach SIA 380/1, siehe Abbildung 14. Die verfügbaren Daten aus den beschriebenen Fallstudien wurden in Tabelle 2 quantitativ zusammengefasst.

Tabelle 2, Quantifizierung des „Performance-Gap“ auf Basis von sieben Fallstudien

Gebäude	Parameter	Verbraucher-kategorie	Einheit	Planung	Messung	Simuliert	Differenz zw. Messung und Berechnung
Chriesbach	Primärenergiebedarf	/	[kWh/m <sup>2</sup> a]	62	87	87	29%
	Raum-temperaturen	/	[°C]	/	/	/	bis max. 2K
Monte Rosa Hütte	Elektrischer Energieverbrauch	/	Faktor	1	3	/	300%
Mövenpick	Elektrischer Energieverbrauch	/	[kWh/a]	40000	64000	/	38%
Actelion Gebäude	Raumtemperatur	/	[°C]	/	/	/	0.1 bis 2.1 K
	Kühlenergiebedarf	/	[kW]	/	/	/	10 bis 100%
HIT ETH Zürich	Energiebedarf	Geräte/Licht	[kWh/m <sup>2</sup> ]	/	60	52	13%
		Gebäude-technik	[kWh/m <sup>2</sup> ]	/	25	5	80%
		Klimakälte	[kWh/m <sup>2</sup> ]	/	21	5	76%
		BWW	[kWh/m <sup>2</sup> ]	/	3.5	7	-100%
		Heizung	[kWh/m <sup>2</sup> ]	/	29	21	28%
				Summe	138.5	90	35%
Bourbaki Panorama	Heizenergieverbrauch	/	[%]	/	/	/	-24%
	Kühlenergieverbrauch	/	[%]	/	/	/	-12%
Mehrfamilienhaus, Zürich	Heizenergieverbrauch	/	[kWh/m <sup>2</sup> ]	120	75	/	38%
		/	[kWh/m <sup>2</sup> ]	120	/	86	28%

#### 4. Diskussion

Die in Tabelle 2 dargestellten Daten machen deutlich, dass der „Performance-Gap“ sowohl ein positives als auch negatives Vorzeichen haben kann, also die berechneten Werte sowohl über- als auch unterschritten werden können. Qualitativ betrachtet können die Abweichungen bis 100% betragen. Im Extremfall bis 300%.

Die Projektbeschreibungen machen deutlich, dass die Ursachen für den „Performance-Gap“ sehr vielfältig sind. Aus den betrachteten Fallstudien können die folgenden sechs Ursachen abgeleitet werden: (1) abweichende Nutzung des Gebäudes und der Anlagentechnik [5/7], (2) Abweichende Anzahl der Gebäudenutzer [4/7]; (3) nicht-bedarfsgerechte Anlagensteuerung [3/7]; (4) unpassender Detaillierungsgrad des Simulationsmodelles [3/7]; (5) Installation von anderen bzw. zusätzlichen Verbrauchern [2/7] und (6) nicht nutzbare Messdaten in Folge zu hoher Messungenauigkeit bzw. fehlerhafter Installation.

Die am häufigsten berichteten Ursachen betreffen die Nutzung. Fünf der sieben Fallstudien begründen den Performance-Gap mit einer abweichende Nutzung des Gebäudes und der Anlagentechnik und vier von sieben von einer abweichenden Anzahl Gebäudenutzer. Der Detaillierungsgrad des Simulationsmodelles wird in drei Fallstudien als Begründung angeführt. Im Detail wird die Zusammenfassung von Raumgruppen zu thermischen Zonen, die Modellierung der Regelungstechnik als open-loop oder closed-loop und die Nutzung passender Klimadatenätze genannt.

#### 5. Schlussfolgerungen

Es wird deutlich, dass die vorgestellten Schweizer Fallstudien mitunter sehr grosse „Performance-Gaps“ aufweisen die jedoch sowohl positiv oder negativ ausfallen können. Im Extremfall übersteigt der Verbrauch den prognostizierten Bedarf, um den Faktor 3, wie der elektrische Energieverbrauch der Monte Rosa Hütte bedingt durch den grossen Besucherandrang nach der Wiedereröffnung.

Die Erkenntnisse aus der Bewertung der Messergebnisse für das HIT Gebäude der ETH Zürich lassen erkennen, dass es wichtig ist, die Energiekennwerte nach Verbrauchern zu differenzieren. Die Ausführungen zeigen, dass es zur Gewährleistung einer gewünschten Energiebilanz auch während der Betriebsphase, drei Dinge braucht: (1) die Betrachtung der Variabilität in der Gebäudenutzung, Spezifikation und Bauqualität schon während der Planungsphase; (2) ein kontinuierliches Betriebsmonitoring während der Gebäudenutzung und (3) ein erweiterbares Modell des Gebäudes und der Gebäudetechnik. Die sechs identifizierten Ursachen und die Häufigkeiten Ihrer Nennung bilden die Grundlage dafür, Arbeitsansätze zum Umgang mit dem „Performance-Gap“ zu formulieren. Als mögliche Ansätze sollten simulationsgestützte Betriebsoptimierung, Building Information Modeling sowie die kontinuierliche Unsicherheitsbetrachtung betrachtet werden.

## 6. Literatur

1. UVEK and BFE, *Energiestrategie 2050 – Erstes Massnahmenpaket*, 2012, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK), Bundesamt für Energie (BFE). p. 228.
2. Higgins, A.J., *Modeled vs. Real Utility Data*. ASHRAE Journal, 2014. **2014**(April): p. 1.
3. Frei, B., F. Reichmuth, and H. Huber, *Vergleichende Auswertung schweizerischer Passivhäuser*, 2004, Hochschule für Technik und Architektur (HTA) Luzern. p. 98.
4. Lenel, S., et al., *Praxistest MINERGIE: Erfahrungen aus Planung, Realisierung und Nutzung von MINERGIE-Bauten*, 2003, Hochschule für Technik, Wirtschaft und Soziale Arbeit: St. Gallen. p. 230.
5. Rütter, H., et al., *Praxistest Minergie-Modernisierung*, 2008, Rütter + Partner, Sozioökonomische Forschung und Beratung, hässig sustech gmbh. p. 127.
6. Fux, S., et al., *Monte Rosa Hütte - Integrierte Haussysteme für optimale Energie- und Stoffbewirtschaftung*, 2012, Bundesamt für Energie (BFE): Bern. p. 48.
7. Markus Gwerder, D.G., Carina Sagerschnig, Roy S. Smith , David Sturzenegger, *Final Report: Use of Weather And Occupancy Forecasts For Optimal Building Climate Control – Part II: Demonstration (OptiControl-II)*. 2013.
8. D., G. and S. C. *A Multi-Stage Approach For Building And HVAC Model Validation And Its Application To A Swiss Office Building*. in *IBPSA 2013*. Chambéry/ France.
9. Naef, R. and S. Stemmler, *Marché International Support Office Kempththal, Kanton Zürich*, 2010, Bundesamt für Energie (BFE): Bern. p. 49.
10. Kämpfen, B., *Marché International Support Office Kempththal - Erfahrungen nach sechs Jahren Betrieb*, 2013.
11. Schälin, A. and M. Sulzer, *Gerüstet für die Zukunft? Gebäudetechnik unter variablen Anforderungen*, in *14. Schweizerisches Status-Seminar "Energie- und Umweltforschung im Bauwesen"2006*, BRENET: Zürich p. 8.
12. Romano, E., *Präsentation an der ERFA Vorgehensberatung der Energieagentur* 2013: St. Gallen.
13. Merzkirch, A., et al., *Wie genau sind unsere Energiepässe?* Bauphysik, 2014. **36**(1): p. 40-43.
14. Moser, R., *Auswertung von 85 GEAK-Berechnungen*, 2014, enerconom.
15. Zürich, S., *Auswertung von 64 Objekten des Energie-Coaching Programms*, 2014, Umwelt- und Gesundheitsschutz Zürich (UGZ).
16. Ménard, M., *Planung versus Messung - Heizwärmebedarf von Neu- und Umbauten*, 2014, Lemon Consult: Zürich.
17. Ott, W., et al., *Erfolgskontrolle 2000-Watt-Gebäude: Forschungsprojekt FP-2.5*, 2014, Energieforschung Stadt Zürich.: Zürich. p. 210.